

## EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

Nicolas Quintan Bernardo<sup>1</sup>  
Natália de Souza Arruda<sup>2</sup>  
Didier Gastmans<sup>3</sup>  
José Guilherme Filgueira<sup>4</sup>  
Zulene Almada Teixeira<sup>5</sup>

Aplicação de múltiplos traçadores hidroquímicos e isotópicos para a definição das condições de circulação das águas subterrâneas nos aquíferos do Vale do Cariri - CE

### *Resumo*

O Vale do Cariri localizado no sul do estado do Ceará, apresenta uma alta densidade populacional e vem enfrentando desafios para atender às demandas hídricas necessárias ao seu desenvolvimento regional. A captação de águas subterrâneas apresenta-se como uma solução viável para suprir essas necessidades, mas requer estudos aprofundados para garantir a qualidade e a sustentabilidade da extração. Estudos hidrogeoquímicos são essenciais nesse contexto, pois permitem entender como os processos de interação entre as águas subterrâneas e as rochas do aquífero imprimem características hidroquímicas às águas, e em combinação com o uso de isótopos ambientais possibilitam avaliar a movimentação das águas subterrâneas nos aquíferos. Na região do Cariri, os aquíferos aflorantes recebem recarga direta da precipitação, bem como recarga antrópica, que introduz no ambiente elementos e compostos que não estão associados ao fluxo natural das águas subterrâneas, acrescentando complexidade às análises hidroquímicas. As águas subterrâneas da região apresentam bicarbonato como ânion predominante, e uma grande variabilidade nos cátions, sem nenhuma predominância entre cálcio, magnésio e sódio. A origem meteórica da recarga foi atestada pela composição isotópica ( $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ), entretanto em tempos distintos, uma vez que variações nas assinaturas isotópicas são corroboradas por distintos tempos de residência, atestados pelos conteúdos em  $^{14}\text{C}$ . Os resultados indicam que as águas com maior tempo de residência, são mais sódicas em comparação às águas recarregadas recentemente, mais cálcicas. Este estudo reforça a importância de abordagens integradas para assegurar a segurança hídrica do Vale do Cariri, evitando contaminações e promovendo o uso sustentável das águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** Interação água-rocha; Qualidade hídrica; Hidroquímica; Isótopos estáveis

<sup>1</sup> Nicolas Quintan Bernardo, Aluno do curso de graduação em Ecologia em Rio Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Centro de Estudos Ambientais, [n.bernardo@unesp.br](mailto:n.bernardo@unesp.br)

<sup>2</sup> Me. Natália de Souza Arruda, Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Rio Claro, Centro de Estudos Ambientais, [ns.arruda@unesp.br](mailto:ns.arruda@unesp.br)

<sup>3</sup> Prof. Dr. Didier Gastmans, Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Rio Claro, Centro de Estudos Ambientais, [didier.gastmans@unesp.br](mailto:didier.gastmans@unesp.br)

<sup>4</sup> Me. José Guilherme Filgueira, Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), [guilherme.filgueira@cogerh.com.br](mailto:guilherme.filgueira@cogerh.com.br)

<sup>5</sup> Dr. Zulene Almada Teixeira, Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), [zulene.almada@cogerh.com.br](mailto:zulene.almada@cogerh.com.br)

REALIZAÇÃO

## INTRODUÇÃO

O Vale do Cariri está localizado na encosta da Chapada do Araripe, que ocupa uma área de 7.500 km<sup>2</sup>, e encontra-se localizada majoritariamente na região sul do estado do Ceará, na divisa entre Piauí e Pernambuco, uma região de grande relevância arqueológica, geológica, ecológica e paleontológica, no entanto, a alta densidade populacional implica em uma demanda significativa de recursos para a sustentação dos ambientes antrópicos, sendo a água um dos principais recursos necessários (Mendonça, 2001).

A área de estudo é caracterizada predominantemente por atividades agrícolas, com produção concentrada em milho e algodão (IBGE, 2017), e geologicamente a Chapada do Araripe apresenta uma variedade de seqüências estratigráficas, compostas majoritariamente por arenitos, siltitos, lamitos e folhelhos (Assine, 2007) (Figura 1).

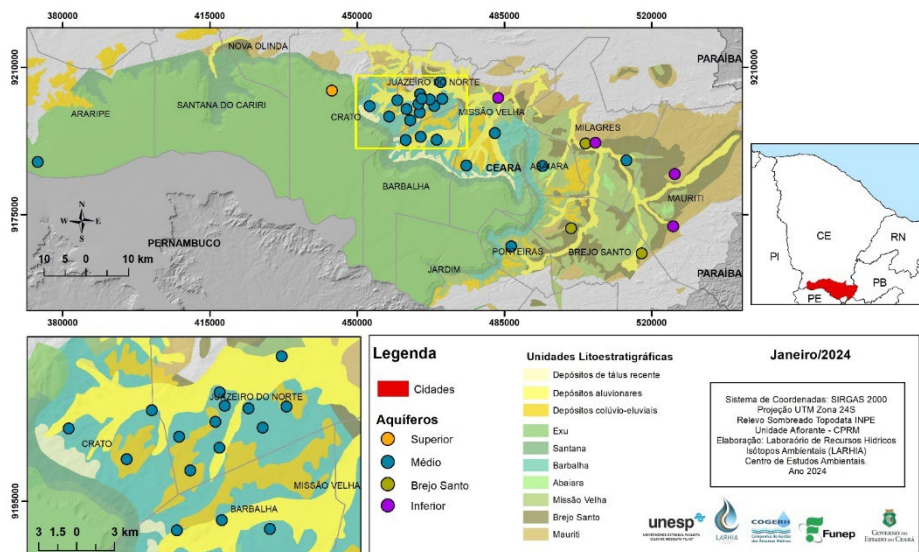
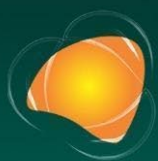


Figura 1: Mapa de Poços com aquíferos e unidades litoestratigráficas

situado em região de clima semiárido, e a principal fonte de abastecimento hídrico é a água subterrânea (Cirilo, 2008). Portanto, é urgente a necessidade de compreender aspectos relacionados a disponibilidade e qualidade do recurso, bem como suas taxas de renovação, a fim de promover políticas sustentáveis de gestão dos recursos hídricos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é caracterizar a composição química e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos presentes no Vale do Cariri, bem como avaliar como as diferenças observadas estão associadas a condições de fluxo e armazenamento,

De acordo com Mendonça (2001), o arcabouço hidrogeológico da região é composto por três unidades aquíferas: o Sistema Aquífero Superior, o Sistema Aquífero Médio e o Sistema Aquífero Inferior e dois aquícludes: Aquíclode Santana e o Aquíclode Brejo Santo.

O Vale do Cariri está



por meio a aplicação de múltiplos traçadores hidroquímicos e isotópicos.

## METODOLOGIA

Foram coletadas amostras de águas subterrâneas diretamente nos cavaletes de 30 poços tubulares na região, entre os dias 15 a 20 de janeiro de 2024. Em campo as amostras foram filtradas (filtro membrana PVDF de 0,45 µm) e armazenadas em frascos de PEAD de 500 mL para as análises de ânions e em tubos de centrífuga de 50 mL para determinação de cátions, alíquotas preservadas com adição de HNO<sub>3</sub> a 1% até atingir pH < 2. Além dessas foram coletadas amostras para a determinação do conteúdo isotópico de H e O em frascos de PEAD de 20 mL e para a determinação de 14C em frascos de PEAD de 500 mL. Todas as amostras foram armazenadas sob refrigeração até a sua entrega aos laboratórios responsáveis pelas análises.

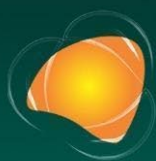
A determinação das concentrações de ânions e cátions foi realizada no laboratório do Centro de Estudos Ambientais da Universidade Estadual Paulista de Rio Claro, por cromatografia iônica e por ICP-OES, respectivamente, enquanto a alcalinidade por titulação com HNO<sub>3</sub>.

Com os dados quantitativos processados e tabelados, utilizou-se o diagrama de Piper (Piper, 1944) para classificar as amostras e identificar as fácies hidroquímicas dessas águas. Além disso, foi calculado o Erro do Balanço Iônico (EBI) seguindo a Equação 1, para verificar a confiabilidade das amostras, sendo esse valor menor que 10%. Para finalizar análises estatísticas de média, mediana, desvio padrão, correlação de Person (Person, 1909) e comparativas com os padrões de potabilidade segundo a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de Maio de 2021.

$$EBI (\%) = \frac{\sum Z \times m_c - \sum Z \times m_a}{\sum Z \times m_c + \sum Z \times m_a} \quad \text{Equação (1)}$$

Z = Carga iônica,  $m_c$  = Molaridade catiônica,  $m_a$  = Molaridade aniônica

As determinações das razões isotópicas de H e O foram realizadas no Centro de Isótopos Estáveis da UNESP em Botucatu, e analisadas pela técnica *Isotope Ratio Mass Spectrometry* (IRMS) determinando as razões isotópicas <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O e <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H, que retornam como *Vienna Standard Mean Ocean Water* (VSMOW). A precisão analítica foi de ± 0,8‰ para δ<sup>2</sup>H e ± 0,26‰ para δ<sup>18</sup>O. Já as amostras para a determinação do conteúdo em 14C foram encaminhadas para os laboratórios da Beta Analytic, e os conteúdos em 14C determinados pelo método *Accelerated Mass Spectrometry* (AMS).



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os erros de balanço iônico apresentaram valores geralmente inferiores a 10%, e apenas 3 amostras apresentaram valores acima do erro aceitável, com destaque para a amostra do poço JUN/037 (-16,97%).

O pH varia significativamente entre os poços, com valores de 4,13 a 8,24, ainda que a maioria das amostras apresente pH neutro. O pH correlaciona-se positivamente com as concentrações de bicarbonato ( $r=0,83$ ) e negativamente com a pressão parcial de  $CO_2$  ( $r=0,93$ ). Isto está diretamente relacionado à química das águas, uma vez que águas com pH mais alto tendem a ser mais bicarbonatadas e

quanto maior a pressão parcial de  $CO_2$  ocorre a formação de ácido carbônico, que torna a água mais ácida (Fetter, 2022).

Comparando os resultados analíticos com o padrão de potabilidade, observa-se que 17% dos poços apresentam alguma anormalidade em relação ao padrão recomendado pelo Ministério da Saúde. Nitrato ( $NO_3^-$ ) e Bário (Ba) são os principais contaminantes encontrados, com quatro amostras fora do padrão para cada um. Chumbo (Pb), Alumínio (Al) e Fluoreto ( $F^-$ ) apresentaram uma amostra fora do padrão cada. Todos os poços com problemas de potabilidade estão localizados na área urbana de Juazeiro do Norte, sugerindo uma recarga induzida, responsável pelo aporte destes contaminantes. No entanto, são necessários mais estudos para identificar a fonte exata desses contaminantes, uma vez que o Bário pode ter origem natural.

A composição isotópica das amostras permite a separação em 4 grandes grupos, indicando variações climáticas importantes no tempo, uma vez que cada um destes grupos apresenta tempos de residência distintos, obtidos a partir dos dados de  $14C$  (Figura 2). As amostras do Grupo 1 representam águas

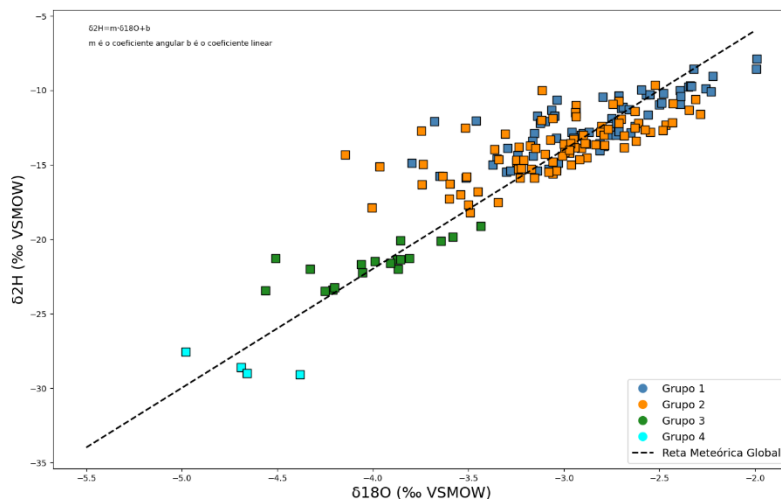
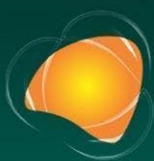


Figura 2: Reta Meteorica Global com os dados de Monitoramento Isotópico



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

com menor tempo de residência, portanto de recarga recente (14C acima de 90% de PMC e idade média de  $\approx 230$  anos) e composição isotópica médias mais enriquecida ( $\delta^{18}O = -2,97\%$ ,  $DP=0,41$  e  $\delta^2H = -12,26$ ,  $DP=2,02$ ). As amostras do Grupo 2 apresentam recargas recentes (14C acima de 75% de PMC e idade média de  $\approx 2.410$  anos),

com composição isotópica ligeiramente mais depletadas ( $\delta^{18}O = -3,16$ ,  $DP=0,40$  e  $\delta^2H \bar{x} = -13,92$ ,  $DP=2,01$ ). As amostras do

Grupo 3 representam águas intermediárias ou misturas entre o grupo 2 e 4, indicando águas antigas e misturadas (14C acima de 20% de PMC e idade média de  $\approx 13.900$  anos), com isotopia mais depletadas ( $\delta^{18}O \bar{x} = -4,17$ ,  $DP=0,35$  e  $\delta^2H \bar{x} = -21,67$ ,  $DP=1,48$ ).

As amostras do Grupo 4 representam paleoáguas (14C abaixo de 10% de PMC, com idade média de  $\approx 33.180$  anos)

com isotopia extremamente depletada com baixa mistura ( $\delta^{18}O = -4,81$ ,  $DP=0,28$  e  $\delta^2H = -28,91$ ,  $DP=0,95$ ).

O diagrama de Piper (Figura 3) permite classificar os grupos isotópicos, indicando que as amostras do Grupo 1 apresenta predominância de Cálcio (Ca), Grupo 2 com maior concentração de Magnésio (Mg), Grupo 3 tendo maior concentração de Sódio (Na) representando o tempo de residência intermediário entre grupos 2 e 4, e o Grupo 4 seria a água mais antiga com mais Cloreto (Cl<sup>-</sup>) e Sódio (Na).

Essa distribuição sugere que os quatro aquíferos não são estratigraficamente separados, mas comunicam-se e tendem a misturar suas águas, conforme indicado pelo padrão hidrogeoquímico e isotópico apresentado.

Nas águas com maior concentração de Cl<sup>-</sup> que estão no Grupo 1 e Grupo 2, observa-se uma

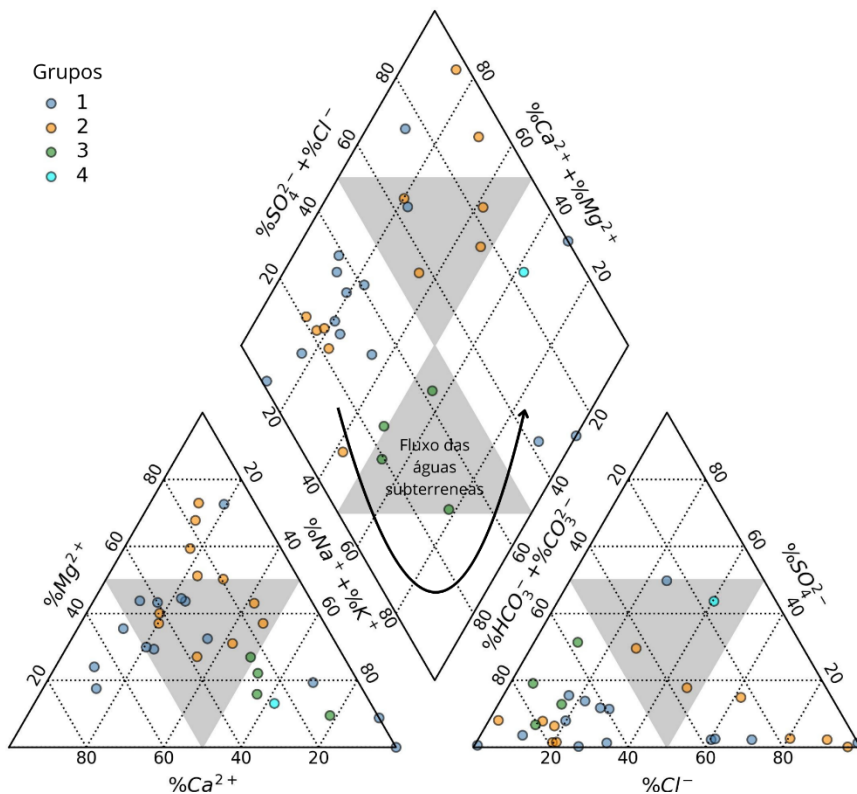
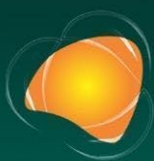


Figura 3: Diagrama de Piper das amostras de Jan/24



## EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

recarga antrópica, com maior concentração de Nitrato, esse padrão é corroborado pelas amostras que tendem a posicionar-se ao lado direito e a ponta superior do diagrama de Piper, explicando por que alguns poços divergem do fluxo das águas.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma análise hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos presentes no Vale do Cariri foi possível identificar que a definição hidroestratigráfica comumente assumida da existência de três aquíferos: Superior, Médio e Inferior, não parece ser tão distinta quanto previamente assumido. A dinâmica do fluxo e movimentação das águas subterrâneas parece não considerar essas unidades, como indicado pelos tempos de residência e sua interação com as rochas, refletida na classificação hidroquímicas, que leva à formação de águas mais sódicas em relação ao tempo de residência, indicando que as águas subterrâneas mais antigas apresentam uma composição química distinta das águas mais recentes.

Uma campanha de amostragem após o período chuvoso pode trazer uma resposta mais efetiva em relação aos processos recentes de recarga, utilizando-se uma mesma abordagem. Mas de forma geral, os resultados aqui apresentados trazem uma nova perspectiva de utilização conjunta de traçadores hidroquímicos e isotópicos como fonte de informação para a melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos em regiões semiáridas.

### REFERÊNCIAS

- Assine, M. L. **Bacia do Araripe**. Boletim de Geociências da Petrobrás, V. 15, P. 371-389 2007.
- Cirilo, J. A. **Políticas Públicas de Recursos Hídricos para o Semi-Árido**. Estudos Avançados, V. 22, N. 63, P. 61-82, 2008.
- Fetter, C. W.; Kreamer, D. **Applied Hydrogeology: Fifth Edition**. [s.l.] Waveland Press, 2021.
- Mendonça, L. A. R. **Recursos hídricos da chapada do Araripe**. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.
- Pearson, K. **Determination of the Coefficient of Correlation**. Science V.30, P. 23-25, 1909
- Piper, A. M. **A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses**. Transactions, American Geophysical Union, V.25, 914. 1944